

MESTRADO e DOUTORADO EM TELECOMUNICAÇÕES

**INSTITUTO NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES
INATEL**

CADERNO DE DISCIPLINAS

2025-2026

V1

I. DISCIPLINAS , EMENTAS & PROFESSORES

Análise de Desempenho de Redes de Telecomunicações (TP-519): Introdução aos Processos Markovianos. Introdução à Teoria de Filas. Análise de desempenho de redes com comutação de pacotes. Análise de desempenho de redes com múltiplo acesso.

✓ Prof. Samuel Baraldi Mafra (P) - Prof. José Marcos C. Brito

Antenas (TP-513): Teoria da irradiação. Características gerais das antenas. Antenas de ondas estacionárias. Redes de antenas. Antenas para micro-ondas. Antenas de faixa larga. Antenas reconfiguráveis. Redes de antenas para MIMO.

✓ Prof. Arismar Cerqueira Sodré Júnior (P)

Comunicações Ópticas (TP-539): Mecanismo de propagação e propriedade das fibras ópticas e dos principais componentes ópticos; sistemas multiplexados em comprimento de onda (WDM); noções básicas de redes ópticas ativas e passivas; redes PON e as suas variantes; projeto e análise de desempenho de sistemas ópticos; impacto dos efeitos lineares e não-lineares no desempenho do sistema; formatos de modulação óptica avançados; comunicações ópticas coerentes.

✓ Prof. Luiz Augusto Melo Pereira (P) - Prof. Arismar Cerqueira Sodré Júnior

Eletromagnetismo Avançado (TP-548): Revisão de álgebra vetorial; Operadores diferenciais vetoriais em coordenadas curvilíneas ortogonais; Função delta de Dirac; Teorema de Helmholtz; Revisão de eletrostática; Técnicas para solução da equação de Laplace em coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas; Revisão da magnetostática; Leis de Ampere e Faraday; Leis de conservação em eletromagnetismo; Simetria das equações de Maxwell; Equações de onda para os campos elétricos e magnéticos; Propagação de ondas eletromagnéticas em meios lineares; Reflexão, transmissão, absorção e dispersão; Modelos de permissividade para meios metálicos; Linhas de transmissão e guias de onda.

✓ Prof. Jorge Ricardo Mejia Salazar (P)

Eletromagnetismo Computacional (TP-544): Revisão de Eletromagnetismo; Estimativa de erro; Diferenças finitas; Problemas de autovalores; Diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD); Método dos elementos finitos (FEM); Método dos momentos (MoM).

✓ Prof. William Orivaldo Faria Carvalho (P) - Prof. Jorge Ricardo Mejia Salazar

Inteligência Artificial e Machine Learning (TP-555): Introdução à inteligência artificial. Conceitos de aprendizado de máquina. Paradigmas de aprendizado. Gradiente Descendente. Regressão linear. Regressão não-linear. Sobreajuste e subajuste. Escalonamento. Regularização. Classificação linear. Aprendizagem Bayesiana. Árvores de decisão. Comitê de modelos. K vizinhos mais próximos. Perceptron. Redes neurais artificiais. Introdução ao Tensorflow. Redução da dimensionalidade. Clusterização.

✓ Prof. Felipe Augusto Pereira de Figueiredo (P) – Profa. Victoria Dala Pegorara Souto – Prof. Luiz Augusto Melo Pereira

Internet das Coisas e Redes Veiculares (TP-546): Introdução às redes IoT, redes de comunicação veicular, novas tecnologias e novos paradigmas de comunicação. Redes IoT e veiculares no contexto da Internet do futuro. Redes de sensores sem fios. Redes de sensores corporais. Internet das coisas. Aplicações de Internet das Coisas. Aplicações

verticais. Redes cooperativas. Redes oportunistas. Redes intermitentes. Redes veiculares. Redes veiculares com ligações intermitentes. Internet das Coisas em Movimento. Estudos de caso. Estudo e Análise crítica de publicações científicas sobre os conteúdos programáticos.

✓ Prof. Samuel Baraldi Mafra (P) – Prof. José Marcos Câmara Brito

Introdução às Telecomunicações (TP-533): Introdução e conceitos iniciais. Funções e equipamentos existentes em uma rede de telecomunicações. Tecnologias para Redes de Telecomunicações.

Prof. Luciano Leonel Mendes (P) - Prof. José Marcos C. Brito (P) - Prof. Samuel Baraldi Mafra – Profa. Victoria Dala Pegorara Souto

Princípios de Simulação de Sistemas de Comunicação (TP-547): Simulação de Monte Carlo. Análise de Intervalo de Confiança. Estudos de Caso (teoria e aplicações): Simulação de Sistemas Contínuos, Simulação de Sistemas Discretos sob Modelos Vetoriais e Matriciais, Simulação de Sistemas com Eventos Discretos.

✓ Prof. Dayan Adionel Guimarães (P) – Prof. Samuel Baraldi Mafra (P) – Prof. Rausley Adriano Amaral de Souza

Probabilidade, Estatística e Processos Estocásticos (TP-501): Introdução à probabilidade. Variáveis aleatórias. Variáveis aleatórias multidimensionais. Momentos das variáveis aleatórias. Funções características de variáveis aleatórias. Algumas distribuições de probabilidade. Limitantes superiores para a probabilidade de cauda. Soma de variáveis aleatórias e teorema do limite central. Geração de números aleatórios. Conceitos básicos de estatística. Processos estocásticos. Resposta de um sistema linear a um sinal aleatório. Estimação de densidade espectral.

✓ Prof. Rausley Adriano Amaral de Souza (P) – Prof. Dayan Adionel Guimarães – Prof. Luciano Leonel Mendes - Prof. Felipe Augusto Pereira de Figueiredo

Propagação (TP-512): Mecanismos de propagação de ondas eletromagnéticas, atenuação por espaço livre, atenuação por obstáculo, modelos empíricos de propagação, propagação no canal de rádio móvel externo e interno: Propagação em grande escala (modelos para perdas no percurso, sombreamento, métodos de predição de cobertura para ambientes externos e internos). Propagação em pequena escala (propagação por multipercurso, funções de correlação do canal, banda e tempo de coerência, modelos e análises estatísticas do desvanecimento multipercurso). Predição de cobertura.

✓ Prof. Luciano Leonel Mendes (P) e Prof. Arismar Cerqueira Sodré Júnior

Redes Convergentes (TP-525): Evolução tecnológica e seus impactos: aumento da capacidade, ubiquidade, miniaturização, generalização do hardware, softwarização e servitização. Integração do mundo físico ao software via representantes (gêmeos digitais). Internet of Things (IoT). Identificação única e mobilidade. Programabilidade de rede: software-defined networking (SDN) e suas abstrações: encaminhamento, redução de estados distribuídos, configuração e especificação. *New generation* SDN (NG-SDN), PISA, P4 e Stratum. Estrutura dos controladores e controlados. Exposição de recursos físicos para o software. Virtualização de funções de rede: network functions virtualization (NFV). Posicionamento de funções virtuais, fatiamento e encadeamento de funções virtualizadas. Redução da interferência humana: self-organizing network (SON), intent-based networking (IBN), self-evolving networking (SEN) e cognitive radio network (CRN). Tudo como um serviço: service-oriented architecture (SOA).

SDN e NFV como serviços. Distribuição de conteúdo na rede: information-centric network (ICN), armazenamento temporário. Segurança, privacidade, confiança, anonimato, rastreabilidade, imutabilidade. Mercados digitais: registro imutável da informação, computação determinística, prova de trabalho, prova de participação, consenso, monetização digital.

✓ Prof. A Definir

Sensoriamento Espectral (TP553): Introdução aos sistemas de rádio cognitivo e ao papel do sensoriamento espectral na alocação dinâmica de banda. Fundamentos de detecção de sinais em canais com ruído e desvanecimento. Teste de hipóteses binário (critérios de Neyman-Pearson, e GLRT). Métricas de desempenho do teste de hipóteses binário (tipos de erro; característica de operação do receptor, ROC; área sob a ROC, AUC; probabilidade de erro de decisão). Sensoriamento espectral (individual, cooperativo, cooperativo distribuído, cooperativo centralizado, fusão de dados, fusão de decisões). Técnicas de detecção aplicadas ao sensoriamento espectral: detecção de energia, detecção por ciclo-estacionariedade, detecção por filtro casado, detecção por autovalores da matriz de covariância do sinal recebido, detecção robusta, detecção para sinais de banda larga.

✓ Prof. Dayan Adionel Guimarães (P) – Prof. Samuel Baraldi Mafra – Prof. Rausley Adriano Amaral de Souza.

Sistemas de Comunicações Móveis (TP518): Princípios de redes móveis, desempenho de sistemas de comunicação em canais radiomóveis, principais técnicas para viabilização de comunicação em canais radiomóveis, arquiteturas de redes sem fio, principais funcionalidades de redes sem fio (hand-off/hand-over, múltiplo acesso, alocação de recursos, provisionamento, controle de potência), funções de rede para mobilidade, gerência de recursos de dados, princípios de canais lógicos, canais de controle e canais de dados, padrões de redes móveis (4G e 5G), princípios de redes 6G.

✓ Profa Victoria Dala Pegorara Souto (P) – Prof. Luciano Leonel Mendes – Prof. Luiz Augusto Melo Pereira

Sistemas Óptico-Wireless (TP552): Perspectiva histórica dos sistemas de comunicações sem fio e ópticos; fundamentos básicos dos sistemas sem fio e ópticos; sistemas, módulos e componentes de RF e ópticos; propagação, canal, fontes de ruído e mecanismo de degradação em sistemas sem fio e ópticos; técnicas de modulação e de multiplexação utilizadas em sistemas sem fio e ópticos; fotônica de microondas; sistemas e tecnologias rádio sobre fibra (RoF); redes óptico-wireless de curta, médio e longo alcance; backhauls e fronthauls de redes celulares baseados em tecnologias óptico-wireless; sistemas e redes óptico-wireless baseadas em rádio definido por software (SDN).

✓ Prof. Arismar Cerqueira Sodré Júnior (P)

Tópicos Avançados em Aprendizado de Máquina (TP-558): Revisão sobre redes neurais artificiais, tensorflow e keras. Redes Neurais Profundas. Redes Neurais Convolucionais. Autoencoders, modelos generativos e adversariais generativos. Modelos de aprendizado por reforço. Redes neurais recorrentes. Redes de atenção. Redes grafo neurais. Modelos de detecção de objetos. Transferência de aprendizado. Aplicações dos modelos estudados.

✓ Prof. Felipe Augusto Pereira de Figueiredo (P)

Tópicos Avançados em Comunicação Digital (TP-545): Esquemas de diversidade. MIMO para diversidade. MIMO para multiplexação. OFDM. MIMO-OFDM. Alocação de recursos para modulações com múltiplas portadoras. Princípios de múltiplo acesso para modulações com múltiplas portadoras. Novas formas de onda.

✓ Prof. Luciano Leonel Mendes (P)

Tópicos Avançados em Fotônica (TP-540): Dispositivos fotônicos lineares; dispositivos fotônicos não-lineares; fibras de cristais fotônicos; óptica não-linear; solitons ópticos; dispositivos ópticos avançados.

✓ Prof. Arismar Cerqueira Sodré Júnior (P) – Prof. Jorge Ricardo Mejia Salazar – Prof. William Orivaldo Faria Carvalho

Tópicos Avançados em IoT e Machine Learning (TP-557): Fundamentos de IoT, sistemas embarcados e Aprendizado de Máquina. Aprendizado supervisionado e não-supervisionado. Redes Neurais. Redes Neurais Profundas. Redes Neurais Convolucionais. TinyML. Ciclo de vida e fluxo de trabalho de aplicações de Aprendizado de Máquina. Tensorflow Lite. Tensorflow Lite Micro. Exemplos práticos de classificação de movimento e objetos, identificação de palavras-chave e detecção de anomalias.

✓ Prof. Samuel Baraldi Mafra (P), Prof. Felipe Augusto Pereira de Figueiredo e Profa. Victoria Dala Pegorara Souto

Transmissão Digital (TP-537): Canais de comunicação, transmissão em banda base, representação e análise do espaço de sinais, modulações digitais, transmissão em banda larga. Tópicos especiais.

✓ Prof. Dayan Adionel Guimarães (P) – Prof. Rausley Adriano Amaral de Souza – Prof. Luciano Leonel Mendes

ANEXO

PROGRAMA DAS DISCIPLINAS

Análise de Desempenho de Redes de Telecomunicações (TP 519)

Ementa: Introdução aos Processos Markovianos. Introdução à Teoria de Filas. Análise de desempenho de redes com comutação de pacotes. Análise de desempenho de redes com múltiplo acesso.

Objetivos do curso:

- 1) Apresentar o conceito de processos Markovianos e estudar os principais aspectos destes processos e suas aplicações
- 2) Analisar o desempenho dos principais modelos de filas existentes e das redes de filas. Espera-se que o aluno seja capaz de resolver problemas envolvendo os modelos apresentados, bem como para novos modelos (simples) de filas. Espera-se também que, por meio de modelamento matemático, o aluno seja capaz de comparar o desempenho de diferentes modelos de filas.
- 3) Analisar o desempenho de redes com comutação de pacotes: espera-se que o aluno seja capaz de aplicar os modelos de filas estudados na análise de desempenho de redes de telecomunicações com comutação de pacotes.
- 4) Analisar o desempenho dos principais protocolos de múltiplo acesso. Espera-se que o aluno seja capaz de resolver problemas envolvendo os modelos apresentados, bem como de criar novos modelos (simples) para outras técnicas de múltiplo acesso. Espera-se também que o aluno seja capaz, por meio de modelamento matemático, de comparar o desempenho das técnicas de múltiplo acesso apresentadas.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Introdução	02
2. Introdução aos processos Markovianos	10
2.1. Definição de processos Markovianos e Cadeias de Markov	01
2.2. Cadeias de Markov de Tempo Discreto	02
2.3. Cadeias de Markov de Tempo Contínuo	02
2.4. Equações de Chapman-Kolmogorov	02
2.5. Classes de Estados	01
2.6. Aplicações	02
3. Introdução à Teoria de Filas	30
3.1. Conceitos gerais e processo de nascimento e morte	02
3.2. Fila M/M/1	02
3.3. Fila M/M/1/N	02
3.4. Fila M/M/N/N	02
3.5. Fila M/M/N	02
3.6. Fila M/G/1	02
3.7. Filas com prioridades	04
3.8. Filas com multiserviços e população finita	02
3.9. Filas com chegada e/ou partida em lotes	04
3.10. Redes de Filas	04
3.11. Filas G/M/1 e G/G/1	04
4. Análise de desempenho de redes com comutação de pacotes	08
5. Análise de desempenho de técnicas de múltiplo acesso	10

5.1. FDMA e TDMA	02
5.2. Aloha e Slotted-Aloha	02
5.3. CSMA e CSMA-CD	02
5.4. Passagem de Ficha	02
5.5. Polling	02

Bibliografia

- 1) Gunter Bolch et ali. Queuing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications, Second edition, Wiley, 2006.
- 2) Brito, José Marcos C. – Múltiplo Acesso em Redes de Telecomunicações. Dissertação de Mestrado. Unicamp,
- 3) Kleinrock, Leonard – Queueing Systems Volume 1: Theory. John Wiley, 1975.
- 4) Kleinrock, Leonard – Queueing Systems Volume 2: Computer Applications. John Wiley, 1976.
- 5) Robertazzi, Thomas G. – Computer Networks and Systems – Queueing Theory and Performance Evaluation. Springer, 2000.
- 6) Dattatreya, G. R. – Performance Analysis of Queuing and Computer Networks. CRC Press, 2008.
- 7) Joseph L. Hammond and Peter J. P. O'Reilly – Performance Analysis of Local Computer Networks, Addison-Wesley, 1986.
- 8) Alberto Leon-Garcia. Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering, Third Edition, Pearson, 2008.

Antenas (TP 513)

Ementa: Teoria da irradiação. Características gerais das antenas. Antenas de ondas estacionárias. Redes de antenas. Antenas para micro-ondas. Antenas de faixa larga. Antenas reconfiguráveis. Redes de antenas para MIMO.

Objetivos do curso: Esta disciplina apresentará os procedimentos para a análise, o projeto e o desenvolvimento de vários modelos de antenas, visando as suas aplicações em diferentes sistemas de radiocomunicações em variadas bandas de frequência, incluindo redes 5G operando na faixa de ondas milimétricas. Serão abordadas estruturas reconfiguráveis em frequência, diagrama de radiação ou polarização, além de redes de antenas para aplicações MIMO.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Teoria da irradiação	04 h
1.1. Equações de Maxwell	
1.2. Funções potenciais auxiliares	
1.3. Equação de onda não-homogênea	
1.4. Caracterização de uma antena	
1.5. Estruturas elementares de irradiação	
1.6. Grandezas para quantificar a irradiação	
1.7. Regiões de influência de uma antena	
2. Características gerais das antenas	08 h
2.1. Tipos comuns de antenas	
2.2. Diagramas de antenas	
2.3. Abertura de feixe	
2.4. Área de feixe	
2.5. Diretividade	
2.6. Ganho da antena	
2.7. Impedância de entrada	
2.8. Largura de faixa da antena	
3. Antenas de ondas estacionárias	06 h
3.1. Tensão e corrente em linhas de transmissão	
3.2. Modelos simples de dipolos	
3.3. Irradiação dos dipolos	
3.4. Impedância de entrada dos dipolos	
3.5. Dipolos múltiplos	
3.6. Ampliação da largura de faixa	
4. Redes de antenas	12 h
4.1. Descrição geral das redes	
4.2. Rede linear	
4.3. Rede planar	
4.4. Redes de dipolos	
4.5. Critérios para síntese de redes	
4.6. Rede Yagi-Uda	
4.7. Rede log-periódica	

4.8. Outros tipos de redes	
5. Antenas para micro-ondas	08 h
5.1. Cornetas eletromagnéticas	
5.2. Antenas com refletores	
5.3. Lentes eletromagnéticas	
5.4. Antenas impressas	
6. Antenas de faixa larga	04 h
6.1. Requisitos dos sistemas modernos de faixa larga	
6.2. Antenas de ondas caminantes	
6.3. Antenas de barra dielétrica	
6.4. Antenas impressas para faixa larga	
6.5. Antenas de fenda gradual	
6.6. Aplicações das antenas de faixa larga	
7. Antenas Reconfiguráveis	10 h
7.1. Antenas reconfiguráveis em frequência	
7.2. Antenas com diagramas de radiação reconfiguráveis	
7.3. Antenas com polarização reconfigurável	
8. Redes de Antenas para MIMO	08 h
8.1. Requisitos de Aplicações MIMO	
8.2. Tipos de Redes de Antenas para MIMO	

Bibliografia

1. BALANIS, C. A. **Teoria de antenas – análise e síntese**. Trad. de J. R. Souza. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2009.
2. RIBEIRO, J. A. J. **Introdução a Engenharia de Antenas**. Santa Rita do Sapucaí: Inatel, 2005.
3. MILLIGAN, T. A. **Modern antenna design**. 2nd. Ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
4. BALANIS, C. A. **Modern antenna handbook**. 1st. Ed. Wiley, 2008.
5. **DING, Zhijun; WANG, Lingyang**. MIMO Antenna Systems for 5G and Beyond. 1. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2024.
6. **ELAZAR, Ephraim; AZARFAN, Mohammad**. Practical Antenna: Design, Analysis, and Applications. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2024.
7. Artigos de revistas especializadas.

Comunicações Ópticas (TP 539)

Ementa: Mecanismo de propagação e propriedade das fibras ópticas e dos principais componentes ópticos; sistemas multiplexados em comprimento de onda (WDM); noções básicas de redes ópticas ativas e passivas; redes PON e as suas variantes; projeto e análise de desempenho de sistemas ópticos; impacto dos efeitos lineares e não-lineares no desempenho do sistema; formatos de modulação óptica avançados; comunicações ópticas coerentes.

Objetivos: Apresentar as principais propriedades e tecnologias das fibras ópticas e dos sistemas de comunicações ópticas, enfatizando o projeto e a análise de desempenho dos mesmos.

Conteúdo Detalhado

	1. Propriedades das fibras ópticas e dos componentes ópticos	Total: 20,0h	
1.1	Mecanismo de propagação e propriedades das fibras ópticas		8,0h
1.2	Transmissores Ópticos		3,0h
1.3	Receptores Ópticos		3,0h
1.4	Amplificadores Ópticos		3,0h
1.5	Componentes ópticos modernos		3,0h
	2. Sistemas multiplexados em comprimento de onda (WDM)	Total: 4,0h	
2.1	Evolução dos sistemas ópticos		1,0h
2.2	Técnicas de multiplexagem no tempo e na frequência		1,0h
2.3	Características dos sistemas CWDM, WDM e DWDM		2,0h
	3. Noções básicas de redes ópticas ativas e passivas	Total: 8,0h	
3.1	Tipos de redes ópticas: acesso, metropolitana e core		2,0h
3.2	Redes ópticas passivas e ativas		2,0h
3.3	Evolução das Redes ópticas		1,0h
3.4	Redes PON e as suas variantes		3,0h
	4. Projeto e análise de desempenho de sistemas ópticos	Total: 12,0h	
4.1	Técnicas de projeto, produto "banda x comprimento" e upgrade do sistema		2,0h
4.2	Sistemas limitados por atenuação e balanço de potência		2,0h
4.3	Sistemas limitados por dispersão		2,0h
4.4	Taxa de erro de bits, fator Q e Diagrama de Olho		2,0h
4.5	Impacto dos efeitos não-lineares		1,0h
4.6	Sistemas limitados por PMD		1,0h
4.7	Codificação de linha e correção de erros		1,0h
4.8	Equipamentos comerciais		1,0h
	5. Formatos de modulação óptica avançados	Total: 8,0h	
5.1	Sistemas ópticos digitais: características e planejamento		2,0h
5.2	Transmissor óptico e formatos de modulação		2,0h
5.3	Tipos de modulação: ASK, FSK, PSK, DPSK e PolSK		4,0h
	6. Comunicações ópticas coerentes	Total: 8,0h	
6.1	Sistemas coerentes básicos		1,0h

6.2	Princípios detecção coerente		1,0h
6.3	Limitações práticas		1,0h
6.4	Esquemas de demodulação		1,0h
6.5	Sensitividade do receptor		1,0h
6.6	Sistemas com múltiplas portadoras		1,0h
6.7	Estudo de casos atuais baseado em artigos do estado da arte		2,0h

Bibliografia

1. J. Senior, “Optical Fiber Communications: Principles and Practice”, Prentice Hall, 3ª Edition, 2008.
2. I. Kaminow, T. Li , A. E. Willner, "Optical Fiber Telecommunications V: Systems and Networks", Academic Press, 5ª Edition, 2008.
3. G. P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, Wiley, 4ª Edition, 2010.
4. R. Hui and M. O’Sullivan, “Fiber Optic Measurement Techniques”, Elsevier, 1ª Edition, 2009.
5. G. Keiser, “Optical Fiber Communications”, McGraw-Hill, 4ª Edition, 2010.
6. G. P. Agrawal, “Lightwave Technology: Telecommunication Systems”, Wiley, 1ª Edition, 2005.
7. **YANG, Chia-Hung.** Optical Communications and Networking for Industrial Applications. 1. ed. Basel: MDPI, 2020.
8. **SHI, Darli; LI, Guangzhi; GAO, Anliang.** Digital Coherent Optical Systems: Architecture, Design, and Applications. 1. ed. Cham: Springer, 2022.

TP 548 – Eletromagnetismo Avançado (TP 548)

Ementa: Revisão de álgebra vetorial; Operadores diferenciais vetoriais em coordenadas curvilíneas ortogonais; Função delta de Dirac; Teorema de Helmholtz; Revisão de eletrostática; Técnicas para solução da equação de Laplace em coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas; Revisão da magnetostática; Leis de Ampere e Faraday; Leis de conservação em eletromagnetismo; Simetria das equações de Maxwell; Equações de onda para os campos elétricos e magnéticos; Propagação de ondas eletromagnéticas em meios lineares; Reflexão, transmissão, absorção e dispersão; Modelos de permissividade para meios metálicos; Linhas de transmissão e guias de onda.

Objetivo: Explorar as propriedades vetoriais do eletromagnetismo e ser capaz de aplicar as equações de Maxwell, em sua forma diferencial, a problemas de propagação sujeitos a diferentes condições de contorno. Manipulação das equações de Maxwell por operadores matemáticos. Proporcionar embasamento matemático para a elaboração de Dissertações de Mestrado e Teses de Doutorado concernentes à teoria e aplicabilidade do Eletromagnetismo na área de comunicações.

Conteúdo detalhado

	1. Revisão de Análise Vetorial	Total: 4,0h	
1.1	Álgebra vetorial e operadores diferenciais vetoriais em coordenadas curvilíneas ortogonais generalizadas: <i>divergência, gradiente, rotacional e laplaciano</i> .		2,0h
1.2	Função delta de Dirac: <i>propriedades da função delta de Dirac em uma, duas e três dimensões</i> .		1,0h
1.3	Teorema de Helmholtz: <i>propriedades dos campos vetoriais</i> .		1,0h
	2. Revisão de Eletrostática	Total: 6,0h	
2.1	Campo elétrico e propriedades diferenciais		1,0h
2.2	Potencial elétrico e equações de Poisson e Laplace		1,0h
2.3	Energia eletrostática de um sistema de cargas		1,0h
2.4	Campo elétrico em condutores e dielétricos		1,5h
2.5	Teorema de Gauss em dielétricos		1,5h
	3. Técnicas Especiais	Total: 12,0h	
3.1	Equação de Laplace, condições de contorno e teoremas de unicidade		2,0h
3.2	Método de imagens		2,0h
3.3	Separação de variáveis para resolver a equação de Laplace: <i>coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas</i> .		4,0h
3.4	Expansão multipolar dos potenciais para grandes distâncias: <i>termos monopolar e dipolar. Campo elétrico de um dipolo</i> .		4,0h
	4. Revisão de Magnetostática	Total: 6,0h	
4.1	Equação de continuidade e conservação da carga		1,0h
4.2	Lei de Biot-Savart		1,0h
4.3	Propriedades diferenciais da indução magnética		1,0h
4.4	Potencial vetorial e momento magnético		2,0h
4.5	Magnetostática de meios magnetizáveis		1,0h
	5. Eletrodinâmica, Equações de Maxwell	Total: 6,0h	
5.1	Força eletromotriz		1,0h
5.2	Indução eletromagnética: <i>lei de Faraday, campo induzido, indutância, energia no campo magnético</i> .		2,0h
5.3	Equações de Maxwell: <i>lei de Ampere, simetria das equações</i>		3,0h

	<i>de Maxwell (carga magnética), campos na matéria, condições de contorno.</i>		
	6. Leis de Conservação	Total: 6,0h	
6.1	Carga e energia: <i>equação de continuidade, teorema de Poynting, energia do campo eletromagnético.</i>		3,0h
6.2	Momento: <i>Tensor das tensões de Maxwell, conservação do momento, momento angular.</i>		3,0h
	7. Ondas Eletromagnéticas	Total: 20,0h	
7.1	Conceito de onda: condições de contorno, polarização		2,0h
7.2	Ondas eletromagnéticas no vácuo e na matéria: <i>equações de onda para campos elétricos e magnéticos, ondas planas monocromáticas, energia e momento das ondas eletromagnéticas, propagação em meios lineares, reflexão e transmissão para incidências normal e oblíqua,</i>		8,0h
7.3	Absorção e dispersão: <i>ondas eletromagnéticas em meios condutores, reflexão em superfícies condutoras, modelos de permissividade dependente da frequência.</i>		4,0h
7.4	Linhas de transmissão: <i>linha coaxial e linhas de microfita.</i>		3,0h
7.5	Guias de onda: <i>multicamadas dielétricas simétrica e assimétrica, guias de onda retangulares, método do índice efetivo.</i>		3,0h

Bibliografia

- [1] Griffiths, D. J. “*Eletrodinâmica*”, 3 ed. Pearson, 2011. **(Livro guia)**
- [2] Sadiku, M. N. O. “*Elementos de Eletromagnetismo*”, 3 ed. Bookman, 2004.
- [3] Gustrau, F. “*RF and Microwave Engineering: fundamentals of wireless communications*”, Wiley, 2012.
- [4] Chuang, S. L. “*Physics of Photonics Devices*”, 2 ed. Wiley, 2009.

Eletromagnetismo Computacional (TP 544)

Ementa: Revisão de Eletromagnetismo; Estimativa de erro; Diferenças finitas; Problemas de autovalores; Diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD); Método dos elementos finitos (FEM); Método dos momentos (MoM).

Objetivos do curso: Introduzir alguns dos métodos mais usados para a resolução das equações de Maxwell. Ao final da disciplina o aluno deverá ser capaz de usar estes métodos para projetar e otimizar dispositivos eletromagnéticos de interesse na ciência e na engenharia.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. INTRODUÇÃO	2h
1.1. História, Aplicações e Motivação	1h
1.2. Formas de avaliação e metodologia de trabalho	1h
2. REVISÃO DE ELETROMAGNETISMO	12h
2.1 Definição de campo (vetorial e escalar)	1h
2.2 Revisão de cálculo vetorial	1h
2.3 Equações de Maxwell	2h
2.4 Condições de contorno	1h
2.5 Energia e momento	1h
2.6 Equação de onda	2h
2.7 Velocidade da onda e relações de dispersão	2h
2.8 Exercícios em aula	2h
3. CONVERGÊNCIA	6h
3.1 Revisão de integração numérica	1h
3.2 Singularidades	1h
3.3 Procedimentos práticos	2h
3.4 Exercício em aula	2h
4. DIFERENÇAS FINITAS	7h
4.1 Introdução	1h
4.2 Exemplo prático	1h
4.3 Solução iterativa da equação de Laplace	1h
4.4 Problemas de autovalores	1h
4.5 A equação de Helmholtz	1h
4.6 Análise de estabilidade	2h
5. DIFERENÇAS FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO (FDTD)	12h
5.1 Introdução	1h
5.2 A equação de onda 1D	1h
5.3 A célula de Yee e grades deslocadas	2h
5.4 FDTD em 3D	2h
5.5 Exemplo prático	2h
5.6 Condições de fronteira e regiões abertas	2h
5.7 Oficina OpenEMS	2h
6 – MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (FEM)	17h
6.1 Introdução	1h
6.2 Bases vetoriais e representação em forma fraca	2h
6.3 FEM 1D	2h

6.4 FEM 2D	2h
6.5 Montagem e malhado não estruturado	1h
6.6 Condições de contorno	1h
6.7 Resolvendo a equação de Laplace	2h
6.8 Exercícios em aula	2h
6.9 Oficina Comsol	4h
7. MÉTODO DOS MOMENTOS (MoM)	4h
7.1 Formulação integral da eletrostática	1h
7.2 Formulação geral	1h
7.3 Integração	1h
7.4 Exemplo prático	1h

Bibliografia

1. Matthew N.O. Sadiku, “Numerical Techniques in Electromagnetics with MATLAB”, Third Edition CRC Press 2009.
2. Thomas Rylander; Pär Ingelström and Anders Bondeson, “Computational Electromagnetics”, Springer 2013.
3. Constantine A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics”, 2nd Edition, Wiley Global Education 2012.
4. Marek S. Wartak, “Computational Photonics: An Introduction with MATLAB”, Cambridge University Press, 2014.

Inteligência Artificial e Machine Learning (TP 555)

Ementa: Introdução à inteligência artificial. Conceitos de aprendizado de máquina. Paradigmas de aprendizado. Gradiente Descendente. Regressão linear. Regressão não-linear. Sobreajuste e subajuste. Escalonamento. Regularização. Classificação linear. Aprendizagem Bayesiana. Árvores de decisão. Comitê de modelos. K vizinhos mais próximos. Perceptron. Redes neurais artificiais. Introdução ao Tensorflow. Redução da dimensionalidade. Clusterização.

Objetivos do curso

O objetivo principal desta disciplina é apresentar os principais paradigmas de aprendizagem de máquina, incluindo uma variedade de algoritmos e técnicas como: regressão, classificação, árvores de decisão, redes neurais, métodos probabilísticos de aprendizagem entre outros. Ao final do curso, os alunos devem ser capazes de entender e aplicar os principais algoritmos e técnicas de aprendizado de máquina em aplicações práticas.

Pré-requisitos

- Probabilidade e Estatística
- Álgebra linear
- Cálculo numérico
- Linguagem de programação Python, nível básico.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Introdução à inteligência artificial	2 h
1.1 Motivação e conceitos básicos	1 h
1.2 Paradigmas de aprendizado de máquina	1 h
2. Regressão	20 h
2.1 Regressão Linear	4 h
2.2 Superfície de erro	2 h
2.3 Gradiente Ascendente e Descendente	2 h
2.4 Regressão Polinomial	4 h
2.5 Subajuste e Sobreajuste	2 h
2.6 Escalonamento	2 h
2.7 Regularização	4 h
3. Classificação	16 h
3.1 Regressão Logística	4 h
3.2 Regressão Softmax	2 h
3.3 k-nearest neighbor (k-NN)	2 h
3.4 Árvores de decisão	2 h
3.5 Aprendizagem Bayesiana	4 h
3.6 Comitê de máquinas	2 h
4. Redes neurais artificiais	14 h
4.1 Modelo de McCulloch e Pitts e perceptron	2 h
4.2 Perceptron de múltiplas camadas	2 h
4.3 Algoritmo de retropropagação do erro	2 h
4.4 Redes neurais artificiais	8 h

5. Redução de dimensionalidade	1 h
6. Aprendizado não-supervisionado	1 h
6.1 Clusterização com K-means	1 h
7. Apresentação dos projetos finais	2 h
8. Avaliação	4 h

Referências

- [1] Athanasios Papoulis and S. Pillai, “Probability - Random Variables and Stochastic Processes”, McGraw Hill Education; 4th ed., 2017.
- [2] Stuart Russell and Peter Norvig, “Artificial Intelligence: A Modern Approach”, Prentice Hall Series in Artificial Intelligence, 3rd ed., 2015.
- [3] Aurélien Géron, "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems", 1st ed., O'Reilly Media, 2017.
- [4] Haykin, Simon S. Neural networks: a comprehensive foundation. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [5] C. M. Bishop, “Pattern Recognition and Machine Learning”, Springer, 1st ed., 2006.
- [6] Rogers, Simon. A first course in machine learning. Co-autor Mark Girolami. Boca Raton, EUA: Editora CRC Press, 2017.
- [7] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio and Aaron Courville, “Deep Learning”, MIT Press, 2016.

Internet das Coisas e Redes Veiculares (TP 546)

Ementa: Introdução às redes IoT, redes de comunicação veicular, novas tecnologias e novos paradigmas de comunicação. Redes IoT e veiculares no contexto da Internet do futuro. Redes de sensores sem fios. Redes de sensores corporais. Internet das coisas. Aplicações de Internet das Coisas. Aplicações verticais. Redes cooperativas. Redes oportunistas. Redes intermitentes. Redes veiculares. Redes veiculares com ligações intermitentes. Internet das Coisas em Movimento. Estudos de caso. Estudo e Análise crítica de publicações científicas sobre os conteúdos programáticos.

Objetivos do curso: O objetivo deste curso compreende o aprofundamento de conhecimentos, competências e investigação na temática relacionada com redes de sensores e Internet das coisas, de redes veiculares e suas aplicações no contexto da Internet do futuro.

Os objetivos específicos para esta disciplina são os seguintes:

- Aprofundar os conhecimentos sobre as novas tecnologias e arquiteturas de redes emergentes, com enfoque nas tecnologias de redes de sensores, redes de sensores corporais, Internet das coisas e redes veiculares com ligações intermitentes e suas aplicações no contexto da Internet do Futuro (ex.: aplicações verticais para a saúde e ambientes de vida assistida);
- Conhecer os avanços mais recentes, utilizar e construir novas soluções, com estas tecnologias de rede emergentes (como redes de sensores, redes de sensores corporais, redes veiculares e redes veiculares com ligações intermitentes) e novos paradigmas de redes e comunicações (redes cooperativas e redes com ligações intermitentes, incluindo as redes oportunistas);
- Aprofundar a cultura científica através do estudo e análise de publicações científicas;
- Compreender o processo de investigação em redes e comunicações, elaborar trabalhos científicos, em tecnologias de redes de próxima geração e efetuar a divulgação dos resultados alcançados.

Ao final da disciplina o aluno deverá ser capaz de:

- Demonstrar capacidade de compreensão sistemática no domínio científico da Internet das coisas e das redes veiculares;
- Conhecer em profundidade as tecnologias de redes de sensores, redes de sensores corporais, Internet das coisas, redes com ligações intermitentes, redes veiculares, redes veiculares com ligações intermitentes e suas aplicações no contexto da Internet do futuro;
- Conhecer as fronteiras do conhecimento em temas deste domínio científico, referidos no ponto anterior;
- Saber analisar um trabalho científico, elaborar o seu resumo, identificar as suas contribuições, efetuar a sua análise e partilhar com os pares;
- Efetuar trabalho científico relacionado com a Internet das coisas e redes veiculares, identificar problemas em aberto neste domínio científico, ser capaz

de formular possíveis soluções, efetuar a avaliação do desempenho das soluções propostas, analisar e preparar a divulgação dos resultados;

- Capacidade para conceber, projetar, adaptar e realizar uma investigação significativa, respeitando os mais elevados padrões éticos e as exigências impostas pelos padrões de qualidade e integridade académicas.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
- Introdução às redes IoT, redes de comunicação veicular, novas tecnologias e novos paradigmas de comunicação	04 h
- Redes IoT e veiculares no contexto da próxima geração da Internet	02 h
- Redes de sensores sem fio	04 h
- Redes de sensores corporais	04 h
- Tecnologias para Internet das Coisas	10 h
- Aplicações de Internet das Coisas	08 h
- Redes cooperativas	02 h
- Redes oportunistas	02 h
- Redes com ligações intermitentes	02 h
- Redes veiculares	06 h
- Redes veiculares com ligações intermitentes	06 h
- Internet das Coisas em Movimento	02 h
- Estudos de caso	04 h
- Estudo e Análise crítica de publicações científicas sobre os conteúdos programáticos	04 h

Bibliografia

- Ian Akyildiz and Mehmet Can Vuran, “Wireless Sensor Networks (Advanced Texts in Communications and Networking)”, Wiley, 2010.
- Jun Zheng and Abbas Jamalipour, “Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective”, Wiley, 2009.
- Hakima Chaouchi, “The Internet of Things: Connecting Objects”, Wiley, 2010.
- Zach Shelby, Carsten Bormann, “6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet”, Wiley, 2010.
- Danda B. Rawat, Joel J. P. C. Rodrigues, and Ivan Stojmenovic, “Cyber-Physical Systems: From Theory to Practice”, CRC Press - Taylor & Francis Group, October 2015, ISBN: 978-1-4822-6333-6, 1st Edition, 570 pages.
- Mieso Denko, “Mobile Opportunistic Networks: Architectures, protocols and applications”, Auerbach Publications, 2010.
- Nuno Garcia and Joel J. P. C. Rodrigues, “Ambient Assisted Living”, CRC Press - Taylor & Francis Group, June 2015, ISBN: 978-1-4398698-4-0, 1st Edition, 777 pages.
- Joel J. P. C. Rodrigues, “Advances in Delay-tolerant Networks (DTNs): Architecture and Enhanced Performance”, Woodhead Publishing Series in

Electronic and Optical Materials: Number 67, Elsevier, ISBN: 978-0-85709-840-5 (print), ISBN: 978-0-85709-846-7 (online), December 2014.

- Chung-ming Huang and Yao-chung Chang, “Telematics Communication Technologies and Vehicular Networks: Wireless Architectures and Applications”, Information Science Publishing, Dec. 2009.
- Paolo Santi, “Mobility Models for Next Generation Wireless Networks: Ad Hoc, Vehicular and Mesh Networks”, Wiley, ISBN: 978-1119992011, 2012.
- Artigos científicos e outras fontes de informação na Web.

Introdução às Telecomunicações (TP 533)

Ementa: Introdução e conceitos iniciais. Funções e equipamentos existentes em uma rede de telecomunicações. Tecnologias para Redes de Telecomunicações.

Objetivos do curso: este curso tem por objetivo apresentar uma ampla visão sobre todas as funções e equipamentos que compõem uma rede de telecomunicações, com abordagem voltada para técnica e não tecnologia. No entanto, ao final do curso apresentam-se algumas das principais tecnologias utilizadas nas redes de telecomunicações.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Introdução e conceitos iniciais	04h
2. Meios de transmissão: par metálico, cabo coaxial, fibra óptica, transmissão sem fio	02 h
3. Codificação de fonte: codificação de voz, dados e vídeo	06 h
4. Modulação digital: ASK, FSK, M-PSK e M-QAM	06 h
5. Codificação de linha: AMI, HDB3, Manchester, B8ZS	02 h
6. Controle de erro: códigos de bloco e convolucionais, CRC, protocolos de retransmissão, ganho de codificação	08 h
7. Princípios de modulação e codificação adaptativas	02 h
8. Sincronização de quadros: caracter de início e fim, flag, violação de codificação de camada física	01 h
9. Controle de fluxo: protocolo de janela deslizante	01 h
10. Protocolos de Enlace: HDLC	01 h
11. Multiplexagem: FDM, TDM, WDM	02 h
12. Endereçamento: tipos de endereçamento e exemplos	01 h
13. Múltiplo acesso: FDMA, TDMA, CDMA, Aloha, Slotted-Aloha, CSMA, CSMA-CD, CSMA-CA e protocolos híbridos	06 h
14. Comutação: estrutura de comutadores de pacotes	02 h
15. Algoritmos de escalonamento: FIFO, PQ, FQ, WFQ	02 h
16. Roteamento: classificação, algoritmos de caminho mais curto, inundação, roteamento por vetor de distância, roteamento hierárquico, roteamentos broadcast e multicast.	06 h
17. Controle de congestionamento: Leaky Bucket, Token Bucket, Choke Packets, RED, WRED.	02 h
18. Tecnologias para Redes de Telecomunicações	06 h

Bibliografia:

- Tanenbaum, Andrew S.; Feamster, Nick e Wetherall, David J. – Redes de Computadores, 6a edição, 2021.
- Kurose, James F. e Ross, Keith W. – Redes de Computadores e a Internet – Uma Abordagem Top-Down, 8ª Edição, Bookman, 2021.
- Stallings, William – Data and Computer Communications, tenth edition, Pearson, 2015.
- Sklar, Bernard. Digital Communications – Fundamentals and Applications, 2nd edition, Prentice Hall, 2001

- Proakis, John G. and Salehi, Masoud, Fundamentals of Communication Systems, 2nd edition, Pearson, 2015.
- Simon Haykin, Michael Moher – Sistemas de Comunicação, 5ª Edição, Bookman Editora, 2011.
- Artigos científicos relacionados ao tema.

Princípios de Simulação de Sistemas de Comunicação (TP 547)

Ementa: Simulação de Monte Carlo. Análise de Intervalo de Confiança. Estudos de Caso (teoria e aplicações): Simulação de Sistemas Contínuos, Simulação de Sistemas Discretos sob Modelos Vetoriais e Matriciais, Simulação de Sistemas com Eventos Discretos.

Objetivos

Do curso: abordar fundamentos de simulação de sistemas de comunicações, permitindo que os alunos sejam capazes de aplicá-los na elaboração e análise de simulações utilizando variadas ferramentas computacionais.

Para o aluno: ao final do curso o aluno deverá ser capaz de: i) demonstrar ter adquirido conhecimento sobre o tema por meio de aproveitamento adequado nas avaliações; ii) modelar, desenvolver e implementar simulações com grau de complexidade compatível com aquelas trabalhadas ao longo do curso; iii) realizar estudos mais avançados sobre o tema.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
<i>Introdução</i>	
Complexidade, multidisciplinaridade e modelos de simulação; simulação determinística e estocástica; softwares para simulação.	2h
<i>Fundamentos</i>	
Amostragem e quantização	2h
Reconstrução e interpolação	2h
Frequência de amostragem em simulações	2h
Envoltória complexa: análise no domínio do tempo	2h
<i>Geração de números aleatórios</i>	
Geração de números aleatórios descorrelacionados	4h
Geração de números aleatórios correlacionados	2h
Aplicações	2h
<i>Métodos de Monte Carlo</i>	
Fundamentos, estimadores	4h
Intervalo de confiança	4h
Aplicações	4h
<i>Modelagem e simulação de não-linearidades</i>	
Modelagem e simulação de não-linearidades sem memória	2h
Modelagem e simulação de não-linearidades com memória	2h
Aplicações	2h
<i>Avaliação</i>	4h
<i>Modelagem e simulação de sinais e sistemas discretos</i>	
Modelos vetoriais e matriciais de sinais e sistemas	4h
Introdução sobre cadeias de Markov	4h
Modelagem e estrutura de simuladores de eventos discretos	4h
Simulação de sistemas de filas	4h
Aplicações	2h
<i>Apresentação de estudo de caso</i>	2h

Bibliografia

- [1] W. Tranter, K. Shanmugan, T. Rappaport, and K. Kosbar. 2003. Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, Inc., 2004.

- [2] M. C. Jeruchim, P. Balaban, and K. S. Shanmugan, Simulation of Communication Systems, 2nd ed., New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.
- [3] S. M. Ross, A Course in Simulation, New York: Macmillan, 1990.
- [4] S. M. Ross, Simulation, 5th Edition, Academic Press, 2013.
- [5] J. Banks et al. Discrete-event system simulation. Pearson, 2005.
- [6] G. S. Fishman. Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis. Springer Science & Business Media, 2013.
- [7] L. Chwif, A.C. Medina. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações. 4ª edição. São Paulo: Elsevier Brasil, 2014. 320 p
- [8] G. S. Fishman. Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications. New York, USA: Springer-Verlag, Inc., 1996.
- [9] D. P. Kroese, T. Taimre, and Z. I. Botev. Handbook of Monte Carlo Methods. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [10] P. Armitage, G. Berry, and J. N. S. Matthews, Statistical Methods in Medical Research, 4th ed. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd., 2002.
- [11] A. Davison and D. Hinkley, Bootstrap Methods and Their Application, ser. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1997.
- [12] F. M. Gardner and J. D. Baker, Simulation Techniques, New York: Wiley, 1997.
- [13] R. Y. Rubinstein, Simulation and the Monte Carlo Method, New York: Wiley, 1981.
- [14] B. D. Ripley, Stochastic Simulation, New York: Wiley, 1987.
- [15] P. Bratley, B. L. Fox, and L. E. Schrage, A Guide to Simulation, 2nd ed., New York: Springer-Verlag, 1987.
- [16] D. A. Guimarães, Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm. Berlin-Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, Inc., 2009.
- [17] D. A. Guimarães, Complex Envelope Based Modems: A Tutorial. Journal of Communication and Information Systems, Vol. 37, No. 1, pp. 34-50, 2020.

Probabilidade, Estatística e Processos Estocásticos (TP 501):

Ementa: Introdução à probabilidade. Variáveis aleatórias. Variáveis aleatórias multidimensionais. Momentos das variáveis aleatórias. Funções características de variáveis aleatórias. Algumas distribuições de probabilidade. Limitantes superiores para a probabilidade de cauda. Soma de variáveis aleatórias e teorema do limite central. Geração de números aleatórios. Conceitos básicos de estatística. Processos estocásticos. Resposta de um sistema linear a um sinal aleatório. Estimação de densidade espectral.

Objetivos do curso: o objetivo deste curso é fornecer os conceitos matemáticos de probabilidade e processos estocásticos, permitindo que os alunos apliquem os modelos estatísticos e as ferramentas matemáticas nos modelos de sistemas de telecomunicações.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
Parte I - Probabilidade e Variáveis Aleatórias	36 h
1. Probabilidade, probabilidade condicional, tentativas repetidas	06 h
2. Variáveis aleatórias: definições, variáveis aleatórias contínuas, variáveis aleatórias discretas, funções de variáveis aleatórias	06 h
3. Média, variância, momentos, função geradora de momentos e função característica	08 h
4. Variáveis aleatórias duplas, funções de variáveis aleatórias duplas, momentos conjuntos e função característica conjunta, distribuições condicionais e valores esperados condicionais.	08 h
5. Sequências de variáveis aleatórias, densidades condicionais e funções característica, teorema dos limites.	04 h
6. Geração de números aleatórios	04 h
Parte II - Estatística	06 h
1. Estimação de parâmetros via média amostral	02 h
2. Análise de coeficiente e intervalo de confiança	02 h
3. Análise de coeficiente e intervalo de confiança com aproximação Gaussiana pelo teorema do limite central	02 h
Parte III – Processos Estocásticos	18 h
1. Processos estocásticos: definições	02 h
2. Classes de estacionariedade	04 h
3. Médias estatísticas de processos estacionários	04 h
4. Passagem de processos aleatórios por sistemas lineares	02 h
5. Análise da densidade espectral de potência de um processo aleatório	02 h
6. Processo aleatório Gaussiano	02 h
7. Ruído térmico	02 h

Bibliografia

- PAPOULIS, A. and PILLAI, S. U. - *Probability, random variables and stochastic processes – 4th edition*. McGraw-Hill, 2002.
- DAVENPORT, W.B. *Probability and random processes: an introduction for applied scientist and engineers*. McGraw-Hill, 1970.

- LEON-GARCIA, A. *Probability and random processes for electrical engineering – third edition*. Addison-Wesley, 2008.
- YNOGUTI, C. A. Probabilidade, Estatística e Processos Estocásticos.TP501: Notas de aula. 2009
- GUIMARÃES, D. A., Probabilidade, Estatística e Processos Estocásticos.M501. Notas de aula
- GUIMARÃES, D. A., *Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm*. Berlin-Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, Inc., December 2009.
- YATES, Roy D.; GOODMAN, David J., *Probability and stochastic processes: a friendly introduction for electrical and computer engineers*. 2 ed. Estados Unidos da América, EUA: John Wiley & Sons, 2005, 519 p. ISBN 0-471-27214-0.
- ALLEN DOWNEY. *Think Stats: Exploratory Data Analysis*. 2nd Edition.
- HOSSEIN PISHRO-NIK. *Introduction to Probability, Statistics, and Random Processes*.
- SARAH IBRI & MOHAMMED SLIMANE. *Probability, Stochastic Processes & Simulation in Python*. 2022.
- https://www.researchgate.net/profile/Sarah-Ibri/publication/360767027_Probability_Stochastic_Processes_and_Simulation_In_Python_e_n/links/628911158ecbaa07fcc893cd/Probability-Stochastic-Processes-and-Simulation-In-Python-en.pdf

Propagação (TP 512)

Ementa: Mecanismos de propagação de ondas eletromagnéticas, atenuação por espaço livre, atenuação por obstáculo, modelos empíricos de propagação, propagação no canal de rádio móvel externo e interno: propagação em grande escala (modelos para perdas no percurso, sombreamento, métodos de predição de cobertura para ambientes externos e internos). Propagação em pequena escala (propagação por multipercurso, funções de correlação do canal, banda e tempo de coerência, modelos e análises estatísticas do desvanecimento multipercurso). Predição de cobertura.

Objetivos do curso: Apresentar aspectos de relevância sobre a propagação das ondas eletromagnéticas nos meios naturais, fazendo uma abordagem qualitativa e quantitativa do seu uso nos sistemas de radioenlaces, incluindo os parâmetros mais importantes para análise e para o projeto desses sistemas.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Conceitos de eletromagnetismo: definição de campo eletromagnético, principais propriedades, equações de onda, vetor de Poynting, direção e velocidades de propagação, polarização de onda e efeito Doppler.	8 h
2. Propagação de onda em diferentes meios: coeficientes de reflexão e refração, difração e espalhamento.	4 h
3. Propagação atmosférica: atenuação por espaço livre, atenuação por obstáculos, modelos de propagação empíricos, modelo de Okumura-Hata, modelo COST, soluções de predição de cobertura.	8 h
4. Modelos de propagação de grande escala: distribuições e estatísticas do sombreamento.	4 h
5. Modelos de propagação de pequena escala: desvanecimento rápido, canais Rayleigh, Rice e Nakagami-m e suas estatísticas.	8 h
6. Impactos do canal radiomóvel: limiar de funcionamento de sistemas de comunicação móvel, taxa de cruzamento de limiar, tempo de inoperância, probabilidade de inoperância.	8 h
7. Modelo discreto de canais com múltiplos percursos: banda de coerência e tempo de coerência de canais radiomóveis.	4 h
8. Modelos de canais para a faixa sub 6 GHz.	4 h
9. Modelos de canais para ondas milimétricas na faixa de 26-28 GHz	4 h
10. Modelos de canais para comunicações em Tera Hertz	4 h
11. Ferramentas computacionais para predição de cobertura	4 h

Bibliografia

1. RIBEIRO, J. A. J. Propagação de ondas eletromagnéticas. 2nd. Ed. São Paulo: Érica, 2008.
2. PICQUENARD, A. Radiowave propagation. London, Macmillan, 1974.
3. COLLIN, R. E. *Antennas and radiowave propagation*. New York, McGraw-Hill, 1985.
4. YACOUN, M. D. *Foundations of mobile radio engineering*. Boca Raton, CRC Press.

5. RAPPAPORT, T. *Wireless communications: principles and practice*. Piscataway, Prentice Hall, 2008.
6. RAPPAPORT, T. et al, *Millimeter wave wireless communications*. Prentice Hall, 2014.
7. Artigos científicos publicados em anais de eventos científicos e periódicos relevantes para a área.

Redes Convergentes (TP 525)

Ementa: Evolução tecnológica e seus impactos: aumento da capacidade, ubiquidade, miniaturização, generalização do hardware, softwarização e servitização. Integração do mundo físico ao software via representantes (gêmeos digitais). Internet of Things (IoT). Identificação única e mobilidade. Programabilidade de rede: software-defined networking (SDN) e suas abstrações: encaminhamento, redução de estados distribuídos, configuração e especificação. *New generation* SDN (NG-SDN), PISA, P4 e Stratum. Estrutura dos controladores e controlados. Exposição de recursos físicos para o software. Virtualização de funções de rede: network functions virtualization (NFV). Posicionamento de funções virtuais, fatiamento e encadeamento de funções virtualizadas. Redução da interferência humana: self-organizing network (SON), intent-based networking (IBN), self-evolving networking (SEN) e cognitive radio network (CRN). Tudo como um serviço: service-oriented architecture (SOA). SDN e NFV como serviços. Distribuição de conteúdo na rede: information-centric network (ICN), armazenamento temporário. Segurança, privacidade, confiança, anonimato, rastreabilidade, imutabilidade. Mercados digitais: registro imutável da informação, computação determinística, prova de trabalho, prova de participação, consenso, monetização digital.

Objetivos do curso: Apresentar e discutir as novas abordagens de arquiteturas convergentes de redes com computação, destacando as suas principais ideias e melhorias. Estudar os principais conceitos em novas arquiteturas, discutindo as sinergias existentes, os desafios em aberto e trabalhos já realizados. Apresentar os fundamentos básicos por trás das novas arquiteturas de informação.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Apresentação da Disciplina	02
2. Evolução Tecnológica e seus Impactos nas Arquiteturas Convergentes	06
2.1. Aumento de Capacidade, Conectividade, Interação.	02
2.2. Ubiquidade e Miniaturização.	02
2.3. Generalização do Hardware, Softwarização e Servitização.	02
3. Integração do Mundo Físico ao Virtual e Vice-versa.	08
3.1. Internet das Coisas e Dispositivos Sociais.	04
3.2. Gêmeos digitais.	02
3.3. Identificação Única e Mobilidade.	02
4. Programabilidade de Rede	06
4.1. Software-Defined Networking (SDN) e suas abstrações: Encaminhamento, Redução de estados distribuídos, Configuração e Especificação.	02
4.2. <i>New generation</i> SDN (NG-SDN), PISA, P4 e Stratum.	02
4.3. Estrutura dos Controladores e Controlados	02
5. Ciberinfraestruturas	08
5.1. Network Functions Virtualization (NFV)	04
5.2. Posicionamento de Funções virtuais, Fatiamento (Slicing) e Encadeamento de Funções Virtualizadas (Service Graph).	04
6. Redução da interferência humana	10

6.1. Computação Autônômica (Self-Management Systems)	02
6.2. Computação Cognitiva (Artificial General Intelligence)	02
6.3. Comunicações Autônômicas (Self-Organizing Network - SON), Self-Evolving Networking (SEN) e Redes Baseadas em Intenção (IBN – Intent-Based Networking).	02
6.4. Comunicações Cognitivas (Cognitive Radio Network - CRN)	02
6.5. Inteligência Artificial e Inteligência Artificial Geral.	02
7. Tudo como um Serviço (Everything-as-a-Service)	04
7.1. Service-Oriented Architecture (SOA)	02
7.2. Ciclo de Vida de Serviços, Projeto CASCADAS	02
8. Distribuição de Conteúdos na Rede	06
8.1. Nomeação, Resolução de Nomes, Identificação, Escopos, Localização, Espaços	04
8.2. Information-Centric Network (ICN), Armazenamento Temporário.	02
9. Segurança, Privacidade, Confiança, Anonimato, Rastreabilidade	04
9.1. Build-in Security, Tussle Networking, Reputação, Relação com identidade, credenciais, identificadores.	02
9.2. Imutabilidade e redes de confiança.	02
10. Mercados Digitais	06
10.1. Registro imutável da informação, prova de trabalho, prova de participação, consenso.	02
10.2. Computação determinística, contratos inteligentes, monetização digital.	02
10.3. Arquiteturas Ethereum e IOTA.	02

Bibliografia

- 1) TRONCO, Tania; New Network Architectures: The Path to the Future Internet, Springer-Verlag GmbH.
- 2) ALBERTI, Antonio M., A Conceptual-Driven Survey on Future Internet Requirements, Technologies, and Challenges, Journal of Brazilian Computer Society, 2013.
- 3) CLARK, David, Designing an Internet, MIT Press, 2018.
- 4) STALLINGS, William. Foundations of modern networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and cloud. United States of America: Pearson Education, 2016. 538 p., il. ISBN 978-0-13-417539-3.
- 5) DAY, John. Patterns in network architecture: a return to fundamentals. New York: Person Education, 2008. 429 p., il. ISBN 978-0-13-706338-3.
- 6) ALBERTI, Novos Renascimentos: Impactos da Tecnologia da Transformação Completa da Sociedade, 2023, Autor Independente. ISBN 978-65-00-58419-6.
- 7) GOERTZEL, Ben, The AGI revolution: an inside view of the rise of artificial general intelligence, 2016. Chamada na biblioteca: 004.8 G597t. ISBN: 9780692756874.
- 8) PAPADIAS, Constantino. Spectrum sharing: the next frontier in wireless networks. 2020. Chamada na Biblioteca: 621.397.2 P213s. ISBN: 978-1-119-55149-2.
- 9) ALBERTI, A. M. Eds. Blockchain technology for Industry 4.0: secure, decentralized, distributed and trusted industry environment. Springer 2020. Chamada na biblioteca: 004.738.5 A334b. ISBN: 978-981-15-1136-3.

- 10) RAJKUMAR, Buyya. Internet of things: principles and paradigms. 2016. Chamada da biblioteca: 004.738.5 B992i, ISBN: 978-0-12-805395-9.
- 11) MAZIN, Gilbert. Artificial intelligence for autonomous networks. 2019. Chamada da biblioteca: 004.8 G464a. ISBN: 978-0-367-57096-5.
- 12) CORREIA, L. M. Architecture and design for the future internet: 4WARD project. 2011. Chamada da biblioteca: 621.391 C824a. ISBN: 978-90-481-9345-5
- 13) W. Ramirez, X. Masip-Bruin, M. Yannuzzi, R. Serral-Gracia, A. Martinez, M.S. Siddiqui, A survey and taxonomy of ID/Locator Split Architectures, In Computer Networks, Volume 60, 2014, Pages 13-33, ISSN 1389-1286.
- 14) B. Ahlgren et al., "Content, connectivity, and cloud: ingredients for the network of the future," in IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 7, pp. 62-70, July 2011.
- 15) Woojik Chun, Tae-Ho Lee, and Taesang Choi. 2011. YANAIL: yet another definition on names, addresses, identifiers, and locators. In Proceedings of the 6th International Conference on Future Internet Technologies (CFI '11). ACM, New York, NY, USA, 8-12.
- 16) J. Pan, S. Paul and R. Jain, "A survey of the research on future internet architectures," in IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 7, pp. 26-36, July 2011.
- 17) G. Xylomenos et al., "A Survey of Information-Centric Networking Research," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 2, pp. 1024-1049, 2014.
- 18) Outros artigos selecionados em revistas especializadas do IEEE, ACM, Elsevier e Springer.

Sensoriamento Espectral (TP 553)

Ementa: Introdução aos sistemas de rádio cognitivo a ao papel do sensoriamento espectral na alocação dinâmica de banda. Fundamentos de detecção de sinais em canais com ruído e desvanecimento. Teste de hipóteses binário (critérios de Neyman-Pearson, e GLRT). Métricas de desempenho do teste de hipóteses binário (tipos de erro; característica de operação do receptor, ROC; área sob a ROC, AUC; probabilidade de erro de decisão). Sensoriamento espectral (individual, cooperativo, cooperativo distribuído, cooperativo centralizado, fusão de dados, fusão de decisões). Técnicas de detecção aplicadas ao sensoriamento espectral: detecção de energia, detecção por ciclo-estacionariedade, detecção por filtro casado, detecção por autovalores da matriz de covariância do sinal recebido, detecção robusta, detecção para sinais de banda larga.

Objetivos

Do curso: abordar fundamentos sobre sensoriamento espectral, permitindo que os alunos se tornem capazes de aplicá-los no estudo e na análise de técnicas de detecção de sinais.

Para o aluno: ao final do curso o aluno deverá ser capaz de: i) demonstrar ter adquirido conhecimento sobre o tema por meio de aproveitamento adequado nas avaliações; ii) modelar, desenvolver e implementar análises com grau de complexidade compatível com aquelas trabalhadas ao longo do curso; iii) realizar estudos mais avançados sobre o tema.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
<i>Introdução</i>	
Introdução aos sistemas de rádio cognitivo a ao papel do sensoriamento espectral na alocação dinâmica de banda.	4h
<i>Fundamentos</i>	
Detecção de sinais em canais com ruído	2h
Detecção de sinais em canais com desvanecimento	2h
Aplicações	2h
<i>Teste de hipóteses binário</i>	
Fundamentos.	2h
Critérios de Neyman-Pearson	2h
Teste de razão de verossimilhança generalizado - <i>GLRT</i>	2h
Aplicações	2h
<i>Métricas de desempenho do teste de hipóteses binário</i>	
Fundamentos: tipos de erro; característica de operação do receptor	4h
Curva ROC; área sob a ROC, AUC e probabilidade de erro de decisão	4h
Aplicações	2h
<i>Sensoriamento espectral</i>	
Sensoriamento individual	4h
Sensoriamento cooperativo e cooperativo distribuído	2h
Cooperativo centralizado, fusão de dados, fusão de decisões	2h
Aplicações	2h
<i>Avaliação</i>	2h
<i>Técnicas de detecção aplicadas ao sensoriamento espectral</i>	
Detecção não-cega, semi-cega e cega	4h
Modelagem do canal de sensoriamento para detecção robusta	4h
Sensoriamento via teorema dos círculos de Gershgorin	4h
Sensoriamento via índice de Gini	4h
Comparação de desempenho de diferentes técnicas de sensoriamento	2h

Bibliografia

- [1] Guimarães, D. A. Spectrum Sensing – A Tutorial. Journal of Communication and Information Systems, 37(1), 10-29. 2022. DOI: 10.14209/jcis.2022.2.
- [2] Fernando, X., Sultana, A., Hussain, S., Zhao, L. Cooperative Spectrum Sensing and Resource Allocation Strategies in Cognitive Radio Networks. SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-73957-1.
- [3] S. Haykin, D. J. Thomson and J. H. Reed, "Spectrum Sensing for Cognitive Radio," in Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 849-877, May 2009.
- [4] Holland, O., Bogucka, H., and Medeisis, A., Opportunistic Spectrum Sharing and White Space Access: The Practical Reality, Wiley Telecom, 2015.
- [5] Sithamparamanathan, K., Giorgetti, A., Cognitive Radio Techniques: Spectrum Sensing, Interference Mitigation, and Localization: Artech House, 2012.
- [6] T. Yucek and H. Arslan, "A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications," IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, First 2009.
- [7] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, and R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey," Physical Communication, vol. 4, no. 1, pp. 40–62, 2011.
- [8] E. Axell, G. Leus, E. G. Larsson, and H. V. Poor, "Spectrum sensing for cognitive radio : Stateof-the-art and recent advances," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 29, no. 3, pp. 101–116, May 2012.
- [9] Atapattu, Saman and Tellambura, Chintha and Jiang, Hai, "Energy Detection for Spectrum Sensing in Cognitive Radio", 2014, Springer Publishing Company, Incorporated.

Sistemas de Comunicações Móveis (TP 518)

Sistemas de Comunicações Móveis (TP518): Princípios de redes móveis, desempenho de sistemas de comunicação em canais radiomóveis, principais técnicas para viabilização de comunicação em canais radiomóveis, arquiteturas de redes sem fio, principais funcionalidades de redes sem fio (hand-off/hand-over, múltiplo acesso, alocação de recursos, provisionamento, controle de potência), funções de rede para mobilidade, gerência de recursos de dados, princípios de canais lógicos, canais de controle e canais de dados, padrões de redes móveis (4G e 5G), princípios de redes 6G.

✓ Profa Victoria Dala Pegorara Souto (P) - Luciano Leonel Mendes e Prof. Antonio Marcos Alberti

Objetivos: Apresentar e discutir arquiteturas, componentes e sistemas de comunicações móveis com foco no estado da arte da pesquisa e dos padrões mais recentes. Apresentar os fundamentos e tecnologias seguindo uma abordagem bottom-up, destacando como elas são integradas de forma a criar os modernos sistemas de comunicações móveis. Discutir os principais aspectos que afetam o desempenho dos sistemas. Cobrir os principais esforços de padronização, com destaque para 4G e 5G. Ao final do curso espera-se que os alunos compreendam os fundamentos mais importantes dos modernos sistemas de comunicações móveis, suas arquiteturas, componentes, sistemas, tecnologias, esforços de padronização, aspectos relevantes para um bom desempenho dos sistemas e redes de comunicação móvel.

Conteúdo detalhado:

Assunto	Carga horária
1. Apresentação da disciplina	1h
2. Introdução	7h
2.1. Princípios de redes móveis: principais blocos sistêmicos e funções de uma rede celular.	1h
2.2. Arquitetura das redes móveis: cluster de células, acesso, backhaul e núcleo da rede.	2h
2.3. Principais técnicas de comunicação digital em sistemas de comunicação móveis: OFDM e SC-FDM: geração, sincronismo, equalização e detecção, codificação de canal, canalização, multiplexagem TDD/FDD, MIMO.	4h
3. Nível físico e de enlace	22h
3.1. Requisitos e restrições: largura de faixa, taxa de dados, máscara de emissão, alcance, BER, PAPR e MER.	2h
3.2. Camada física do LTE e 5G: diagrama em blocos, parâmetros de modulação, estrutura de quadro, múltiplo acesso e alocação de recursos.	2h
3.3. Plano de dados e plano de controle: canais de dados e canais de controle do LTE e 5G. Multiplexação do plano de dados e do plano de controle.	2h
3.4. Modulação e codificação adaptativa: indicador de qualidade de canal, modos de transmissão.	2h
3.5. Padrões de reuso de frequência em redes móveis e padrões de interferências nos modos TDD e FDD. Cuidados com interferência em comunicação assimétrica no modo TDD. Princípio de Cooperative MultiPoint.	2h
3.6. Controle de potência e controle temporal em redes móveis.	2h

3.7. A camada física do 3GPP NR – cenários, novos requisitos e frequências de operação, codificação de canal, F-OFDM, MIMO massivo, parâmetros de comunicação digital, small cells e aplicações.	6h
3.8. Tendências para o futuro das redes 5G e 6G: cenários, aplicações, requisitos e novas tecnologias.	4h
4. Nível lógico e de rede	20h
4.1. Programabilidade (Software-Defined Networking) e fatiamento de recursos	2h
4.2. Computação em nuvem/fog, unidades de rádio remotas, rede de acesso baseada em cloud: Cloud-based Radio Access Networking (C-RAN), Multi-Access Edge Computing (MEC) e Next Generation RAN (NG-RAN).	2h
4.3. Virtualização (Network Function Virtualization) e funções virtuais de rede	4h
4.4. Gerência de recursos e elasticidade de RAN	2h
4.5. Gerência de tráfego e auto-organização (Self-Organizing Networking)	2h
4.6. Gerência de mobilidade	2h
4.7. Caching, prefetching e distribuição de conteúdo (Content Distribution Network)	2h
4.8. Outros aspectos: Offloading, relaying, nesting, rede híbrida terrestre satélite, Núcleo e acesso 5G padrão 3GPP. N3A - Non 3GPP Access Trusted e Untrusted, Estrutura do Free5GC - Free 5G core, Kubernetes, scripts Helm e outros aspectos do Projeto My5G	4h
5. Arquitetura 5G do 3GPP	10h

Bibliografia:

- 1) Andrea Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005.
- 2) Moray Rumney, LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges 2nd Edition, Wiley, 2013.
- 3) Gordon Stuber, Principles of Mobile Communication, Springer; 4th ed. edição, 2017.
- 4) Mojtaba Vaezi, Zhiguo Ding, H. Vicent Poor, Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond, Springer, 2018.
- 5) Afif Osseiran, Jose Monserrat, Patrick Marsch, 5G Mobile and Wireless Communications Technology, Cambridge University Press, 2016.
- 6) Fei Hu, Opportunities in 5G Networks, CRC Press, 2016,
- 7) Liu, J., Au, K., Maaref, A., Luo, J., Baligh, H., Tong, H., ... Lorca, J. (2018). Initial Access, Mobility, and User-Centric Multi-Beam Operation in 5G New Radio. *IEEE Communications Magazine*, 56(3), 35–41.
- 8) Ferrus, R., Sallent, O., Perez-Romero, J., & Agusti, R. (2018). On 5G Radio Access Network Slicing: Radio Interface Protocol Features and Configuration. *IEEE Communications Magazine*, 56(5), 184–192
- 9) S. Wijethilaka and M. Liyanage, "Survey on Network Slicing for Internet of Things Realization in 5G Networks," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 957-994, Secondquarter 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3067807.
- 10) P. K. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess and A. Benjebbour, "Design considerations for a 5G network architecture," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 11, pp. 65-75, Nov. 2014.

- 11) T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta and D. Sabella, "On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1657-1681, thirdquarter 2017.
- 12) Baranda, J., Mangues-Bafalluy, J., Pascual, I., Nunez-Martinez, J., Cruz, J. L. D. la, Casellas, R., Turyagyenda, C. (2018). Orchestration of End-to-End Network Services in the 5G-Crosshaul Multi-Domain Multi-Technology Transport Network. *IEEE Communications Magazine*, 56(7), 184–191.
- 13) Rost, P., Banchs, A., Berberana, I., Breitbach, M., Doll, M., Droste, H., ... Sayadi, B. (2016). Mobile network architecture evolution toward 5G. *IEEE Communications Magazine*, 54(5), 84–91.
- 14) T. Zhang, H. Qiu, L. Linguaglossa, W. Cerroni and P. Giaccone, "NFV Platforms: Taxonomy, Design Choices and Future Challenges," in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 18, no. 1, pp. 30-48, March 2021, doi: 10.1109/TNSM.2020.3045381.
- 15) Shin, M.-K., Lee, S., Lee, S., & Kim, D. (2017). A way forward for accommodating NFV in 3GPP 5G systems. 2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC).
- 16) Mademann, F. (2018). The 5G System Architecture. *Journal of ICT Standardization*, 6(1), 77–86.
- 17) W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi and H. D. Schotten, "The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 334-366, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3057679.
- 18) C. -X. Wang *et al.*, "On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 905-974, Secondquarter 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3249835.
- 19) C. D. Alwis *et al.*, "Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 836-886, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3071496.
- 20) M. T. Lemes, A. M. Alberti, C. B. Both, A. C. De Oliveira Júnior and K. V. Cardoso, "A Tutorial on Trusted and Untrusted Non-3GPP Accesses in 5G Systems—First Steps Toward a Unified Communications Infrastructure," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 116662-116685, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3219829.
- 21) Outros artigos selecionados em revistas especializadas do IEEE, ACM, Elsevier e Springer.
- 22) Entregáveis de projetos relacionados a comunicações móveis, em especial da União Europeia, EUA e Ásia.
- 23) Entregáveis do projeto Brasil 6G.

Sistemas Óptico-Wireless (TP 552)

Ementa: Perspectiva histórica dos sistemas de comunicações sem fio e ópticos; fundamentos básicos dos sistemas sem fio e ópticos; sistemas, módulos e componentes de RF e ópticos; propagação, canal, fontes de ruído e mecanismo de degradação em sistemas sem fio e ópticos; técnicas de modulação e de multiplexação utilizadas em sistemas sem fio e ópticos; fotônica de microondas; sistemas e tecnologias rádio sobre fibra (RoF); redes óptico-wireless de curta, médio e longo alcance; backhails e fronthauls de redes celulares baseados em tecnologias óptico-wireless; sistemas e redes óptico-wireless baseadas em rádio definido por software (SDN).

Objetivos do curso:

- 1) Apresentar os fundamentos básicos dos sistemas de comunicações sem fio e ópticos, assim como a integração dos mesmos.
- 2) Apresentar os componentes básicos, as tecnologias e as vantagens dos sistemas óptico-wireless.
- 3) Explorar as aplicações dos sistemas óptico-wireless em sistemas celulares.
- 4) Capacitar os alunos para a realização de simulações numéricas, implementações e análises de desempenho dos sistemas óptico-wireless.
- 5) Proporcionar embasamento científico para a elaboração de Dissertações de Mestrado e Teses de Doutorado relacionadas aos sistemas óptico-wireless aplicados a diversos segmentos das telecomunicações.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Perspectiva histórica dos sistemas de comunicações sem fio e ópticos	04
2. Fundamentos básicos	08
2.1. Fundamentos básicos dos sistemas sem fio	04
2.2. Fundamentos básicos dos sistemas ópticos	04
3. Sistemas Rádio Sobre Fibra	04
4. Interfaces Ópticas para Sistemas Wireless	04
5. Sistemas Fibra-Wireless (FiWi)	04
6. Convergência Óptico-Wireless para X-Haul de Redes 5G	04
7. VLC- Visible Light Communication	08
7.1 – Definição e Tecnologias VLC	04
7.2 – Aplicações VLC	04
8. FSO - Free-Space Optics	08
8.1 – Definição e Tecnologias FSO	04
8.2 – Aplicações FSO	04
9. OWC - Optical Wireless Communications	08
9.1 – Definição e Tecnologias OWC	04
9.2 – Aplicações OWC	04
10. FSO para Redes Metro e de Acesso Ópticas	04
11. Técnicas MIMO para Óptico-Wireless, FSO e VLC	04

Bibliografia

1. Ivan B. Djordjevic, “*Advanced Optical and Wireless Communications Systems*”, Springer, 1st ed, 2018.
2. Massimo Tornatore et al, “*Fiber-Wireless Convergence in Next-Generation Communication Networks: Systems, Architectures, and Management (Optical Networks)*”, Springer, 1st ed., 2017.
3. Z. Ghassemlooy et al, “*Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*”, CRC Press; 1 edition, 2017.
4. Vijay Janyani et al, “*Optical and Wireless Technologies: Proceedings of OWT 2017*”, Springer; 1st ed., 2018.
5. Matthew N.O. Sadiku, “*Optical and Wireless Communications: Next Generation Networks*”, CRC Press; 1 edition, 2002.
6. Murat Uysal et al, “*Optical Wireless Communications: An Emerging Technology*”, Springer; 1st ed. 2016.
7. KHAN, Qammer H.; PATHAN, Al-Sakib Khan. “*Hybrid Communication Systems: For Future and Beyond*”, 1st ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2024.
8. LIN, Jie; HU, Fuhong; ZHANG, Zhihui. “*Handbook of Radio and Optical Networks Convergence*”, 1st ed. Singapura: Springer, 2024.
9. Artigos Científicos Especializados nas áreas de comunicações sem fio, comunicações ópticas e fotônica de micro-ondas.

Tópicos Avançados em Aprendizado de Máquina (TP-558)

Ementa: Revisão sobre redes neurais artificiais, tensorflow e keras. Redes Neurais Profundas. Redes Neurais Convolucionais. Autoencoders, modelos generativos e adversariais generativos. Modelos de aprendizado por reforço. Redes neurais recorrentes. Redes de atenção. Redes grafo neurais. Modelos de detecção de objetos. Transferência de aprendizado. Aplicações dos modelos estudados.

Objetivos do curso: O objetivo desta disciplina é apresentar aos alunos uma visão ampla e detalhada sobre diferentes modelos avançados de redes neurais e suas aplicações em diferentes áreas do conhecimento. Ao final do curso, os alunos devem ser capazes de entender e aplicar na prática os diferentes modelos estudados.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Introdução	4 h
1.1 Revisão sobre redes neurais artificiais	02 h
1.2 Revisão sobre Tensorflow e keras	02 h
2. Redes Neurais Profundas	3 h
3. Redes Neurais Convolucionais	3 h
4. Fundamentos de Visão Computacional	3 h
5. Autoencoders	3 h
6. Modelos Generativos	6 h
6.1 Redes Adversariais Generativas	03 h
6.2 Autoencoders Variacionais	03 h
7. Modelos de aprendizado por reforço	9 h
7.1 Introdução ao aprendizado por reforço	03 h
7.2 Deep Deterministic Policy Gradient	03 h
7.3 Deep Q Network	03 h
8. Redes Neurais recorrentes	3 h
9. Redes de atenção	3 h
10. Redes grafo neurais	3 h
11. Modelos para detecção de objetos	6 h
11.1 RetinaNet	03 h
11.2 Yolo	03 h
12. Transferência de aprendizado	3 h
13. Trabalhos e Laboratórios	8 h
14. Apresentação dos Projetos Finais	3 h

Referências

[1] Stuart Russell and Peter Norvig, “Artificial Intelligence: A Modern Approach”, Prentice Hall Series in Artificial Intelligence, 3rd ed., 2015.

- [2] Aurélien Géron, "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems", 1st ed., O'Reilly Media, 2017.
- [3] Bishop, "Pattern Recognition and Machine Learning", Springer, 2006.
- [4] Skansi, Sandro. Introduction to deep learning: from logical calculus to artificial intelligence. Cham - Suíça: Editora Springer, 2018.
- [5] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville. "Deep Learning". MIT Press 2016.
- [6] Kevin P. Murphy. "Machine Learning: A Probabilistic Perspective", MIT Press 2012.

Tópicos Avançados em Comunicação Digital (TP 545)

Ementa: Esquemas de diversidade. MIMO para diversidade. MIMO para multiplexação. OFDM. MIMO-OFDM. Alocação de recursos para modulações com múltiplas portadoras. Princípios de múltiplo acesso para modulações com múltiplas portadoras. Novas formas de onda.

Objetivos do curso: ao final da disciplina o aluno deverá ser capaz de:

- 1) Compreender os princípios dos esquemas de diversidade;
- 2) Compreender os princípios e dimensionar sistemas com múltiplas portadoras ortogonais e avaliar a probabilidade de erro em canais seletivos;
- 4) Empregar as técnicas de diversidade espacial e espaço-temporal para minimizar a probabilidade de erro de símbolo;
- 5) Utilizar sistemas MIMO-OFDM com objetivo de obter ganhos de diversidade, ganhos de multiplexação e ambos;
- 6) Compreender os princípios e aplicações de sistemas OFDMA e MIMO-OFDMA.
- 7) Conhecer os recentes esquemas de modulação digital empregando múltiplas portadoras não ortogonais.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Introdução	2 h
2. Diversidade de recepção – princípios	2 h
3. MRC – princípios e desempenho	6 h
4. STC – princípios e desempenho	4 h
5. Multiplexação – princípios do VBLAST	6 h
6. OFDM: Geração e recepção, estimação de canal e sincronismo.	4 h
7. OFDM: Análise de desempenho: canais AWGN, seletivo em frequência e variantes no tempo.	4 h
8. OFDM: Análise da PAPR e influência de canais não lineares	4 h
9. OFDM: STC e SFC, estimação de canal em esquemas com diversidade e análise de desempenho em canais seletivos/móveis. Vantagens e desvantagens de cada esquema	4 h
10. OFDMA: princípios e alocação de recursos	4 h
11. MIMO-OFDMA	4 h
12. OFDM óptico: princípios e aplicações	4 h
13. Generalized Frequency Division Multiplexing: princípios e aplicações	4 h
14. Filter Bank Multicarrier: princípios e aplicações	4 h
15. Filtered OFDM: princípios e aplicações	4 h

Bibliografia

1. Benedetto e Biglieri, Principles of Digital Transmission, Plenum Pub, 1999.
2. Bahai e Saltzberg, Multi-carrier Digital Communications – Theory and Applications of OFDM, Kluwer Academic, 1999.
3. Mendes, et al, GFDM: Providing Flexibility for the 5G Physical Layer, book chapter, 2016.

4. M.Bellanger, et al, FBMC Physical layer: a primer, technical report, PHYDYAS project, 2010.
5. Velamala, Filter Bank Multicarrier Modulation for Spectrally Agile Waveform Design, tese de mestrado, Instituto Politécnico de Worcester.
6. Abdoli, et al, Filtered OFDM: a new waveform for future wireless systems, SPAWC, 2015.
7. Suvra Sekhar Das, Ramjee Prasad, Orthogonal Time Frequency Space Modulation: OTFS a waveform for 6G , 1st Edition, River Publishers, 2021
8. Artigos de revistas especializadas na área.

Tópicos Avançados em Fotônica (TP 540)

Ementa: Dispositivos fotônicos lineares; dispositivos fotônicos não-lineares; fibras de cristais fotônicos; óptica não-linear; solitões ópticos; dispositivos ópticos avançados.

Objetivos do curso: Explorar tecnologias avançadas em fotônica para o aprimoramento dos conceitos estudados em TP539 e TP544, com a finalidade de realização de pesquisa de alto nível na área.

Conteúdo detalhado

Assunto		Carga Horária	
	1. Propagação de Pulsos Lineares	Total: 12,0h	
1.1	Pulso retangular, gaussiano e super-gaussiano		2,0h
1.2	Modulação de um laser semiconductor		2,0h
1.3	Propagação de um pulso em meios dispersivos		2,0h
1.4	Teoria de propagação de pulsos		4,0h
1.5	Prática de simulação		2,0h
	2. Óptica Não-linear	Total: 8,0h	
2.1	Propagação de pulsos não-lineares		1,0h
2.2	Método Split-Step Fourier		2,0h
2.3	Equacionamento e modelagem de efeitos não-lineares		5,0h
	3. Dispositivos Ópticos Não-lineares	Total: 6,0h	
3.1	Aplicações de efeitos não-lineares		1,0h
3.2	Processos paramétricos		1,0h
3.3	Técnicas para projeto de dispositivos		4,0h
	4. Guias de Ondas	Total: 12,0h	
4.1	Óptica de raios e modos guiados		2,0h
4.2	Teoria eletromagnética de guias de onda		2,0h
4.3	Equação de ondas e modos de propagação		4,0h
4.4	Avanços e novos desenvolvimentos em guias especiais		2,0h
4.5	Prática de simulação		2,0h
	5. Fibras de Cristais Fotônicos (PCFs)	Total: 8,0h	
5.1	Teoria básica e tipos de PCFs		3,0h
5.2	Projeto, fabricação e aplicações das PCFs		4,0h
5.3	Dispositivos ópticos baseados em PCFs		1,0h
	6. Sistemas Solitônicos	Total: 4,0h	
6.1	Sólitons em fibras ópticas		1,0h
6.2	Amplificação e interação dos sólitons		2,0h
6.3	Sistemas solitônicos		1,0h
	7. Avanços em óptica e fotônica	Total: 10,0h	
7.1	Dispositivos ópticos avançados		3,0h
7.2	Técnicas de projeto de dispositivos ópticos avançados		3,0h
7.3	Fabricação de dispositivos ópticos avançados		2,0h
7.4	Casos práticos e tendências para o futuro		2,0h

Bibliografia

1. G. P. Agrawal, “Nonlinear Optics”, Academic Press, 3th Edition, 2001.
2. G. P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, Wiley, 4th Edition, 2010.
3. G. Keiser, “Optical Fiber Communications”, McGraw-Hill, 4th Edition, 2010.
4. G. P. Agrawal, “Lightwave Technology: Telecommunication Systems”, Wiley, 1st Edition, 2005.
5. Marek S. Wartak, “Computational Photonics: An Introduction with MATLAB”, Cambridge University Press, 1st Edition, 2013.
6. Ting-Chung Poon and Taegeun Kim, “Engineering Optics With Matlab”, World Scientific Publishing Co., 1st Edition, 2006.
7. Periódicos especializados.

Tópicos avançados em IoT e Machine Learning (TP-557)

Ementa: Fundamentos de IoT, sistemas embarcados e Aprendizado de Máquina. Aprendizado supervisionado e não-supervisionado. Redes Neurais. Redes Neurais Profundas. Redes Neurais Convolucionais. TinyML. Ciclo de vida e fluxo de trabalho de aplicações de Aprendizado de Máquina. Tensorflow Lite. Tensorflow Lite Micro. Exemplos práticos de classificação de movimento e objetos, identificação de palavras-chave e detecção de anomalias.

Objetivos do curso

O objetivo principal desta disciplina é apresentar os principais paradigmas de aprendizado de máquina aplicados a dispositivos IoT embarcados. O curso será orientado a projetos, com aulas introdutórias sobre os tópicos abordados e, na sequência, laboratórios e estudos dirigidos para fixação dos conceitos introduzidos, além de um projeto final. Ao final do curso, os alunos devem ser capazes de entender e aplicar os principais algoritmos e técnicas de aprendizado de máquina em aplicações práticas utilizando dispositivos IoT embarcados.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Introdução	1 h
2. Fundamentos de IoT e sistemas embarcados	2 h
2.1 Visão geral do hardware de dispositivos microcontrolados	1 h
2.2 Visão geral do software de dispositivos microcontrolados	1 h
3. Aprendizado de Máquina	8 h
3.1 Fundamentos de aprendizado de máquina (ML)	1 h
3.2 Aprendizado Supervisionado (regressão e classificação)	1 h
3.3 Aprendizado Não-Supervisionado (clusterização, redução de dimensionalidade)	1 h
3.4 Fundamentos de Deep Learning (DL)	1 h
3.5 Redes Neurais Convolucionais (CNN)	1 h
3.6 Fundamentos de Visão Computacional (VC)	1 h
3.7 Métricas de desempenho de modelos de ML (divisão do conjunto de dados, regressão e classificação)	1 h
3.8 Evitando o sobreajuste	1 h
4. Introdução ao TinyML	4h
4.1 O que é TinyML	1 h
4.2 Desafios envolvidos no uso de TinyML	1 h
4.3 Noções básicas sobre ML embarcado	1 h
4.4 Aplicações de TinyML	1 h
5. Introdução à plataforma Edge Impulse	2 h
6. Ciclo de vida e fluxo de trabalho de aplicações de aprendizado de máquina	1 h
7. Introdução às bibliotecas Tensorflow (TF) Lite e TFLite Micro	2 h
8. Visão geral do kit de desenvolvimento TinyML	1 h
9. Exemplos de uso da biblioteca TFLite Micro	2 h
10. Classificação de Movimento	5 h
10.1 Introdução	1 h

10.2 Exemplos de classificação de movimento	1 h
10.3 Casos de uso reais.	1 h
10.4 Laboratório 1: Classificação de gestos	2 h
11. Detecção de anomalias	5 h
11.1 Introdução	1 h
11.2 Exemplos de detecção de anomalias	1 h
11.3 Casos de uso reais.	1 h
11.4 Laboratório 2: Detecção de anomalias	2 h
12. Identificação de palavras-chave	5 h
12.1 Introdução	1 h
12.2 Exemplos de identificação de palavras-chave	1 h
12.3 Casos de uso reais.	1 h
12.4 Laboratório 3: Identificação de palavras-chave	2 h
13. Visual Wake Words	5 h
13.1 Introdução	1 h
13.2 Exemplos de Visual Wake Words	1 h
13.3 Casos de uso reais.	1 h
13.4 Laboratório 4: Visual Wake Words	2 h
14. Classificação de imagens	5 h
14.1 Introdução	1 h
14.2 Exemplos de classificação de imagens	1 h
14.3 Casos de uso reais.	1 h
14.4 Laboratório 5: Classificação de imagens	2 h
15. Estudos individuais + trabalho final (em grupo)	12 h

Bibliografia

- [1] Daniel Situnayake and Pete Warden, “TinyML: Machine Learning with TensorFlow Lite on Arduino and Ultra-Low-Power Microcontrollers”, 1st ed., O'Reilly Media, 2019.
- [2] Agus Kurniawan, "IoT Projects with Arduino Nano 33 BLE Sense: Step-By-Step Projects for Beginners", Apress, 2020.
- [3] Aurélien Géron, "Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems", 1st ed., O'Reilly Media, 2017.
- [4] Stuart Russell and Peter Norvig, “Artificial Intelligence: A Modern Approach”, Prentice Hall Series in Artificial Intelligence, 3rd ed., 2015.
- [5] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville. “Deep Learning”, MIT Press, 2016.
- [6] Hakima Chaouchi, “The Internet of Things: Connecting Objects”, Wiley, 2010.
- [7] Jun Zheng and Abbas Jamalipour, “Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective”, Wiley, 2009.

Transmissão Digital (TP 537)

Ementa: Canais de comunicação, transmissão em banda base, representação e análise do espaço de sinais, modulações digitais, transmissão em banda larga. Tópicos especiais.

Objetivos: Ao final do curso o aluno deverá ser capaz de:

- Demonstrar ter adquirido conhecimento sobre o conteúdo ministrado, por meio do aproveitamento adequado nas avaliações, em termos das notas obtidas.
- Realizar estudos mais avançados sobre os assuntos ministrados na disciplina ou sobre temas relacionados a ela.

Conteúdo detalhado

Assunto	Carga horária
1. Canais de comunicação	8 h
1.1. Canais de comunicação diversos, <i>cobertos por meio de estudo dirigido</i> .	0 h
1.2. Canais de comunicação sem fio externos	8 h
2. Transmissão em banda base	12 h
2.1. Códigos de linha.	1 h
2.2. Sinalização M-PAM.	1 h
2.3. Detecção de pulsos em banda base sob ruído AWGN.	2 h
2.4. Filtro casado e correlator.	1 h
2.5. Critérios MAP e MV.	1 h
2.6. Análise de probabilidade de erro.	2 h
2.7. Interferência intersimbólica	2 h
2.8. Diagrama de olho de diagrama da banheira	1 h
2.9. Equalização de canal ZF e LMS.	1 h
3. Representação e análise do espaço de sinais	8 h
3.1. Representação geométrica de sinais.	1 h
3.2. Dimensionalidade de um sinal e de um espaço de sinais.	1 h
3.3. Ortogonalização de Gram-Schmidt.	1 h
3.4. Receptor de máxima verossimilhança (MV) em canal AWGN	2 h
3.5. Análise de probabilidade de erro	2 h
3.6. Receptor MV para canais com IIS.	1 h
4. Modulações digitais	14 h
4.1. Modulações digitais básicas.	1 h
4.2. Detecção coerente e não coerente.	1 h
4.3. Eficiência espectral e eficiência de potência.	1 h
4.4. Modulações M-PSK com detecção coerente.	2 h
4.5. Modulações M-QAM com detecção coerente.	1 h
4.6. Modulações M-FSK com detecção coerente.	1 h
4.7. Efeitos de amplificação não linear em sinais modulados.	1 h
4.8. Modulações especiais (GMSK, OQPSK e $\pi/4$ DQPSK)	1 h
4.9. Modulações M-FSK com detecção não coerente.	1 h
4.10. Modulação DBPSK com detecção diferencialmente coerente.	1 h
4.11. Sincronismo de portadora.	1 h
4.12. Sincronismo de símbolo.	1 h
4.13. Desempenho de modulações em canal com desvanecimento.	1 h

5. Transmissão em banda larga	4 h
5.1. Noções sobre espalhamento espectral	4 h
6. Tópicos especiais	14 h
6.1. Essa parte do curso é destinada a cobrir tópicos relacionados à disciplina de acordo com seu apelo em termos de interesse para a pesquisa no momento que a disciplina for ministrada.	14 h

Bibliografia

- [1] GUIMARÃES, D. A., Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer Verlag, December 2009.
- [2] GUIMARÃES, D. A. e de SOUZA, R. A. A., Transmissão Digital - Princípios e Aplicações. São Paulo, Brasil: Editora Érica, 2012.
- [3] HAYKIN, S., Communication Systems, 4th Edition. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2001.
- [4] PROAKIS, J. G., Digital Communications, 3rd Edition, New York USA: McGraw Hill, Inc., 1995.
- [5] GUIMARÃES, D. A., Complex Envelope Based Modems: A Tutorial. Journal of Communication and Information Systems, Vol. 37, No. 1, pp. 34-50, 2020.